



Forblad

En Skyskraber bygget paa Sand

K.Ewaldsen

Tidsskrifter

BSM 8-2 Bygningsstatistiske Meddelelser

1936

EN SKYSKRABER BYGGET PAA SAND IAGTTAGELSER AF JORDTEORETISK ART

AF H. EWALDSEN

I Fig. 1 ses et Billede af en Gibsmodel, der viser Bygningen, som er projekteret af den idérige franske Arkitekt *Sajous*, under Medvirkning af Ingeniør *Rendu*, og bygget af Firmaet *Christiani & Nielsen*, Rio de Janeiro, for et derværende Forretningshus »Mestre & Blatge«.

Taarnet er 100 Meter højt.

Bygningen staar med sit Pladefundament paa et Sandlag af stor Mægtighed, og der melder sig straks følgende tre Spørgsmaal:

- 1) Hvorledes bestemmes Grundens tilladelige Bæreevne?
- 2) Hvor meget vil Bygværket sætte sig?
- 3) Hvorledes er Spændingsfordelingen under Fundamenterne?

Det er endnu ikke muligt at give udtømmende Svar paa disse Spørgsmaal, som er den jordteoretiske Videnskabs Kerne, og i hvis Besvarelse den ser sit Maal, men allerede nu kan man, navnlig for første og andet Spørgsmaals Vedkommende, anstille saadanne Betragtninger, at man kan opnaa Resultater, der dog tilnærmelsesvis er rigtige.

Grundens Bæreevne:

I Fig. 2 ses Resultaterne af en Skylleboring, der blev udført ca. 30 Meter fra Byggestedet, som et Led i en lang Række Boringer, der for Tiden udføres af Byen Rio de Janeiro. De Undersøgelser, der blev foretaget af vort Firma paa Byggestedet, naaede kun ned i ca. 6 Meters Dybde, men viste, ligesom den senere Udgravning bekræftede, at Sandlaget her begynder allerede ca. 1,50 Meter under Jordoverfladen. Sandets Kornkurve ses i Fig. 3. Kurvens Abscisse er bestemt af Ligningen:

$$d = 2^{-x}.$$

d er Korndiameteren og x Abscissen. Denne Maade at fastlægge Abscissen paa er angivet af *Terzaghi* og har den Egenskab, at Korndiameteren halveres ved, at man gaar fra et vilkaarligt Punkt x til Punktet $x-1$. Sandet er en fintkornet, skarpkantet Kvantssandart med en Tilsætning af

nogle Procent Slam. For at danne sig et Begreb om Sandets Porøsitet og Sammentrykningsmuligheder, blev der gjort nogle Forsøg, som viste, at dersom man oproder Sandet under Vand og lader det henstaa, finder man, at det efter kort Tids Henstand besidder en Hulrumsprocent $n = 38$ og et Poreciffer $\varepsilon = 63$, idet dette sidste bestemmes af

$$\varepsilon = \frac{n}{100 - n}.$$

Stampede man derimod Sandet under lagvis Indbringelse i Prøvekarret, fandt man $n = 34$ og $\varepsilon = 51$.

Som Grundlag for Bedømmelsen af Sandlagets tilladelige Bæreevne skal her anvendes en Formel angivet af *Fröhlich* i hans Bog: »Druckverteilung im Baugrunde« 1934:

$$q = \frac{\pi \cdot \gamma \cdot t}{\cot \varphi - \left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)},$$

hvor q er den tilladelige Belastning paa Grunden, γ er Jordens Vægtfylde, t er Funderingsdybden i Meter, φ er Jordens indre Friktionsvinkel. Formlen hviler paa den Opfattelse, at man maa skelne imellem to Arter af Kornbevægelser i en Sandmasse, nemlig dels elastiske og dels plastiske. De første er tilladelige, de sidste ikke. Formlen skal angive den maksimale Randbelastning,

hvor endnu ingen plastiske Kornbevægelser finder Sted. *Fröhlich* udtrykker sig saaledes, at Sandet endnu ikke er begyndt at flyde.

I nærværende Tilfælde er Funderingsdybden 2,60 Meter, medens Grundvandstanden er 1,70 Meter under Overfladen. Vægtfylden over Grundvandstanden sættes til

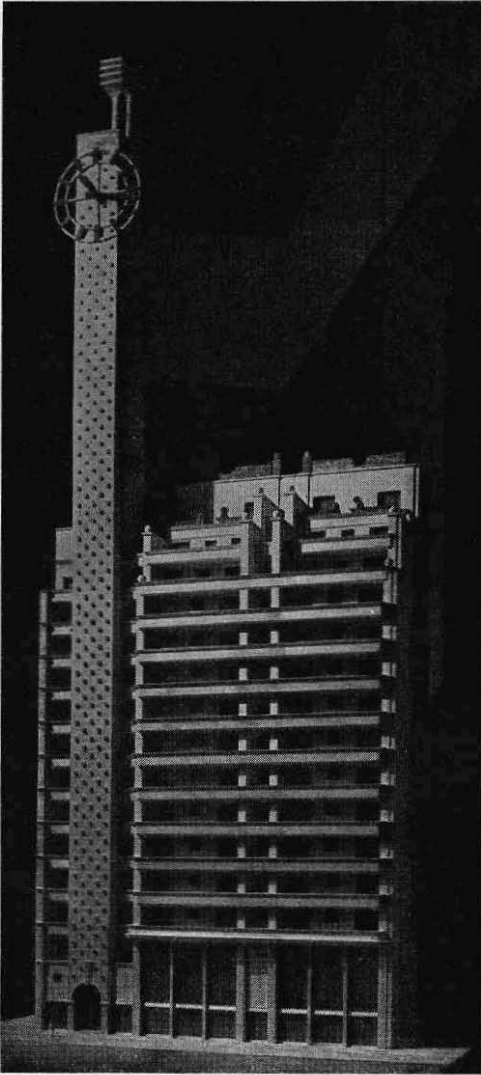


Fig. 1.

$$\gamma_1 = (1 - n) \gamma = (1 - 0,34) 2,65 = 1,75 \text{ t/m}^3$$

og under Grundvandet til

$$\gamma_2 = \gamma_1 - (1 - n) \cdot 1 = 1,75 - 0,66 = 1,09 \text{ t/m}^3.$$

Formlens sidste Størrelse, nemlig Jordens indre Friktionsvinkel, er langt den vanskeligste at bestemme. De klassiske Teorier om Jordtryk sætter den lig Skræntvinklen, men denne Opfattelse er forlængst forladt. I Tyskland har man bestemt den ved rene Forskydningsbrud, hvilket er utilfredsstillende, da Forholdene i Virkeligheden er helt andre end de af den benyttede Forsøgsmaskine bestemte.

I de sidste Aar har Professor Buismann anvendt en Metode, der støtter sig paa Mohr's Brudteori, idet han anbringer Sand i en Celle af tyndt Stof og udsætter Cellen for Tryk i flere Retninger. Ved at lade en af Hovedspændingerne vokse, medens de to andre holdes konstant, vil tilsidst Brud indtræffe, hvorefter den indre Friktionsvinkel lader sig beregne. Der er næppe Tvivl om, at det er rigtigt at benytte sig af den Mohrske Brudteori

ved Undersøgelser over den indre Friktionsvinkel, men Spørgsmaalet er langt fra klarlagt endnu. Det er nemlig saaledes, at under selve Forsøget paa at bestemme Vinklen ændrer denne sig. Under nogle stort anlagte Forsøg, som blev udført i U. S. A. under Terzaghi's Ledelse (Engineering News Record 1934, No. 5, 8, 10, 13 & 16), viste det sig, at den indre Friktionsvinkel under samme Forsøg varierede imellem $9^{\circ}40'$ og $53^{\circ}50'$. For i nærværende Tilfælde at faa Kendskab til Friktionsvinklen, konstruerede man et Apparat, der bygger paa Mohr's Teori, men som det vil føre for vidt at beskrive. Kun skal det bemærkes, at det ogsaa her viste sig, at Vinklen antager en Række Værdier under det samme Forsøg, og at Spørgsmaalet derfor bliver dette: hvad er den indre Friktionsvinkels Størrelse, i det Øjeblik, da Sandets Kornbevægelse gaar over fra at være elastiske til at være plastisk. Efter mange Forsøg, dels med det Sand, paa hvilken Bygningen hviler, og dels med andre Sandarter, mente man at kunne angive Grænserne for den søgte Vinkel til 35° og 38° , og at disse Grænser forblev omtrent de samme over som under Vand.

Ved nu at indsætte de fundne Talværdier i Formlen ovenfor, finder man da:

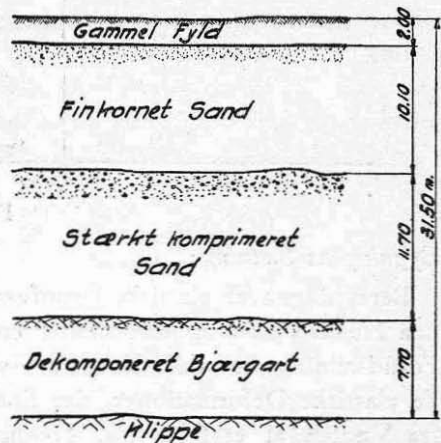


Fig. 2.

for $\varphi = 35^\circ$ $q = 2,65 \text{ kg/cm}^2$

for $\varphi = 38^\circ$ $q = 3,34 \text{ kg/cm}^2$.

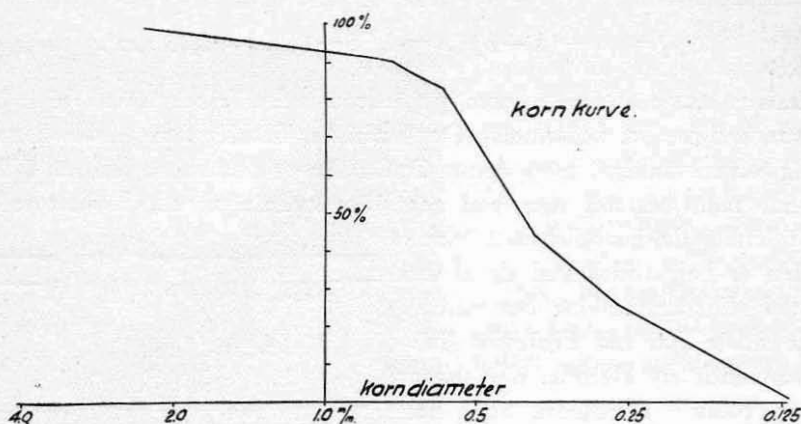


Fig. 3.

Bygningens Sætning:

Beregningen af elastiske Formforandringer indenfor faste Legemer hviler paa Hooke's Lov og forudsætter en konstant Elasticitetskoefficient. Denne Forudsætning har ikke længere Gyldighed, naar Talen er om at beregne de elastiske Deformationer, der finder Sted i et Sandlag under Indflydelse fra Vægten af et Bygværk. Fröhlich foreslaar i sin allerede omtalte Bog, at man lader Elasticitetskoefficienten variere efter Ligningen:

$$E = \frac{p + p_0}{\omega}$$

p er det variable Tryk, p_0 er et konstant Initialtryk, og ω er en for en given Sandart karakteristisk Konstant. For at kunne beregne en elastisk Deformation kræves det, at man foruden at kende Elasticitetskoefficienten ogsaa kender Spændingsfordelingen i Sandmassen. Grundlaget her er det Spændingsbillede, der er angivet for det isotropiske Halvrum af Boussinesq, nærmere udviklet og behandlet af flere Forfattere, blandt andre Fröhlich. Denne naar til, at Nedsynkningen af en belastet, stiv, cirkelrund Plade kan udtrykkes ved

$$W = \frac{1}{4} \cdot \frac{\omega \cdot q_0}{\gamma} \left(F_1(c) - \frac{1}{2} F_2(c) \right).$$

Her betyder:

W Nedsynkningen i cm,

γ Vægtfylden af Sandet under Pladen,

ω den under Omtalen af Elasticitetskoefficienten nævnte Konstant.

q_0 Enhedsbelastningen under Pladen i kg/cm^2 ,

$$F_1(c) = \frac{1}{(1+c^2)^2} [2(1+c^2) + \pi \cdot c(1+3c^2) - 4(1+2c^2) \ln c],$$

$$F_2(c) = \frac{1}{(1+c^2)^2} [-2(1+c^2) + \pi \cdot c(3+c^2) - 4 \ln c],$$

$$c = \frac{1}{r} \left(t + \frac{q_0}{\gamma} \right),$$

r Pladens Radius,

t Fundamentets Underkant under Jordoverfladen.

Denne Formel blev nu i det foreliggende Tilfælde benyttet saaledes, at man ved nogle Forsøg belastede en stiv Jernbetonplade 35×35 cm og maalte dens Nedsynkning, hvorved man af Formlen fandt ω . Idet man derefter i Formlen indsatte det fundne ω og de Talværdier, der iøvrigt svarede til det færdige Bygværk, fandt man da dettes Nedsynkning.

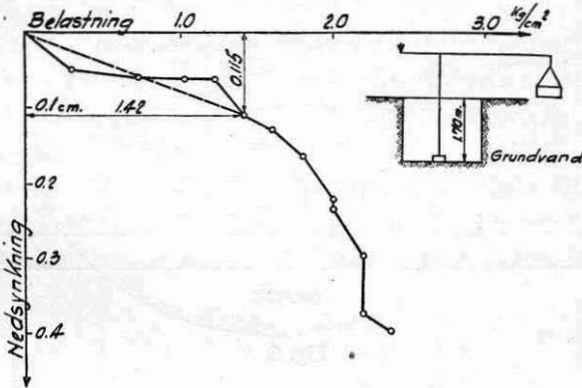


Fig. 4.

Forsøgsarrangementet til Bestemmelse af ω er vist skematisk i Fig. 4, hvor tillige Nedsynkningskurven er angivet, fra hvilken man tager $q_0 = 1,42 \text{ kg/cm}^2$ og $W = 0,115 \text{ cm}$. Paa Grund af manglende Tid blev der kun udført to Forsøg. Til Bestemmelse af Nedsynkningen blev anvendt to Deflektionsmaalere. Den i Fig. 4 viste Kurve angiver Forløbet af det første Forsøg, hvor Ordinaterne er Middeltallet af Aflæsningerne paa de to Deflektionsmaalere. Det Punkt, der er valgt som Basis for Beregningerne, er et Fællespunkt for de to Forsøgskurver. Endvidere har man:

$$\pi \cdot r^2 = 35 \times 35 = 1225 \text{ cm}^2, \quad r = 19,75 \text{ cm}$$

$$t = 0, \quad \gamma = 1,09 \text{ t/m}^3.$$

Herefter finder man $c = 72$ og tilsidst $\omega = 317 \times 10^{-5}$.

Som det fremgaar af Fig. 5, er Bygningens Fundament trapezformet, med det totale Areal $604,6 \text{ m}^2$. En hertil svarende Cirkel har en Radius paa 14 m. Yderligere finder man:

$$F_1(c) - \frac{1}{2} F_2(c) = 2,32.$$

Idet Husets samlede Vægt, eksklusive de øverste 40 Meter af Taarnet, er beregnet til 10 500 t paa det Tidspunkt, da den sidste Maaling fandt Sted, finder man $q_0 = 1,74 \text{ kg/cm}^2$, saaledes at

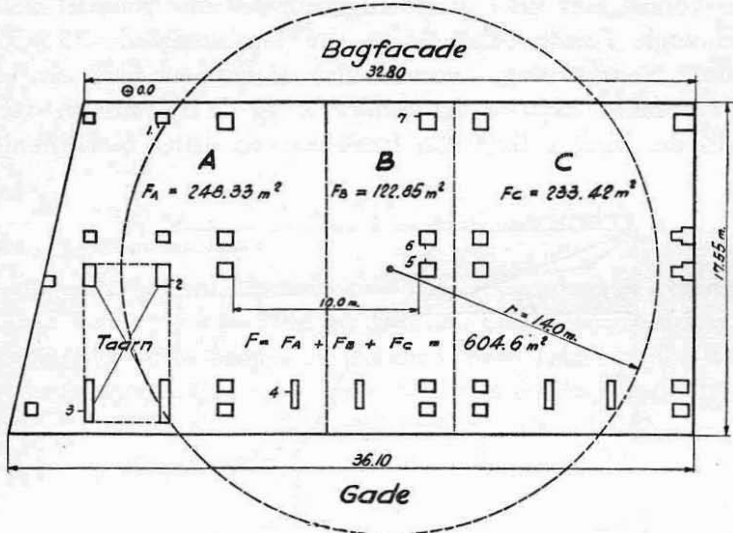


Fig. 5.

$$W = \frac{1}{4} \cdot \frac{317 \cdot 1,74}{0,00109} \cdot 2,32 \cdot 10^{-5} = 2,94 \text{ cm.}$$

For at faa undersøgt, hvorledes denne teoretiske Sætning svarede til de virkelige Forhold, blev der udført en Række Nivellementer, der viste Sætningens Forløb under Bygningens Vækst. Det skal dog straks her bemærkes, at Nivellementet ikke er komplet. Dels er dets Punkter ikke fordelt over hele Bygningens Areal, men kun over den Halvdel, der bærer Taarnet, dels lykkedes det ikke at faa organiseret Nivelleringer, før den første Del af Skelettet var støbt. Hele Bygningen, som foruden den egentlige Skyskraber, bestaar af to meget store Salgshaller, blev bygget saa at sige over Hovedet paa Ejeren med samt hans meget talrige Personale og den til Forretningen hørende store Kundekreds. Det vil forstaas, at dette bevirkede betydelige Komplikationer, og maa heri søge Forklaringen paa de to omtalte Mangler ved Nivellementet.

Nivellementet er udført paa den af *Terzaghi* angivne Maade, men da hverken Tiden eller Økonomien tillod Anskaffelsen af de af ham angivne

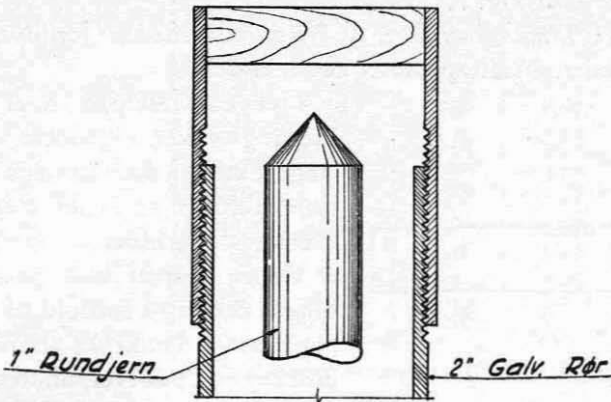


Fig. 6.

Maaleinstrumenter, maatte simple Maaleredskaber anvendes paa Bekostning af Nøjagtigheden. Nulpunktet blev tilvejebragt ved at ramme et 6 Meter langt 2" galvaniseret Rør ned i Jorden udenfor det store Fundament — se Fig. 5.

Inden i dette Rør blev saa en 12 Meter lang 1" Rundjernsstang slaet ned, hvorefter den øverste Ende af Stangen blev tilfilet og beskyttet som vist paa Fig. 6. I syv af Bygningens Søjler blev derefter indstøbt korte

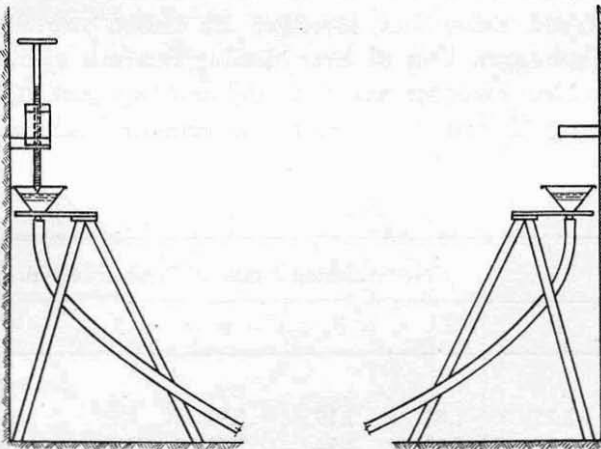


Fig. 7.

Rundjernsstykker, tjenende som Højdemærker. Deres Fordeling over Grundplanen ses i Fig. 5. Punkterne 2 og 3 sidder i hver sin af de fire Søjler, der bærer Taarnet.

Til selve Nivelleringen anvendtes en tykvægget $\frac{5}{8}$ " Gummislange, forsynet i begge Ender med en Tragt. Denne sættes fast i en Gaffel fastgjort til et Treben — se Fig. 7.

De ret store Tragte bevirker, at Vædskeoverfladen forbliver rolig, medens man maaler. Maaleapparatet ses i Fig. 8.

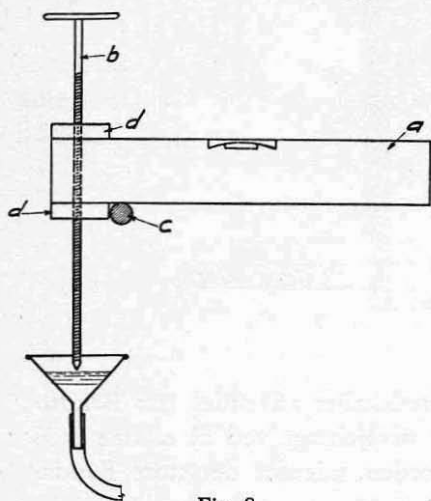


Fig. 8.

a er et Waterpas. d er paaskruede Messingstykker, igennem hvilke den lange Skruer b kan bevæge sig. Denne bærer foroven en Plade. c er det Højdemærke, det gælder at indmaale. Efter at de to Treben med paasat Tragt er bragt i Stilling i Forhold til f. Eks. Nulpunktet og Punkt 1, anbringes Maaleinstrumentet paa Nulpunktet, og Skruens Spids bringes til Anslag mod Vandoverfladen. Apparatet anbringes derefter paa Punktet No. 1 og man tæller det Antal Omdrejninger, der er nødvendige for paany at bringe Skruens Spids til at berøre Vandet. Ved at multiplicere Antallet af Drejninger med Skruengangs-

højden, som er kendt, faas den søgte Højdeforskel.

Resultatet af de 9 Maalinger, der blev udført, fremgaar af Tabel No. 1. Den første Maaling fandt Sted, da det femte Betondække var støbt (Kote 16,8), medens den sidste blev foretaget, da Huset, vægtmæssig set, var ca. 98 % færdigtbygget. Den til hver Maaling svarende øjeblikkelige Vægt af Bygningen blev beregnet saa godt det lod sig gøre og opdelt i tre Partier, A, B og C, saaledes at Partiet A rummer Taarnpartiet, B er et

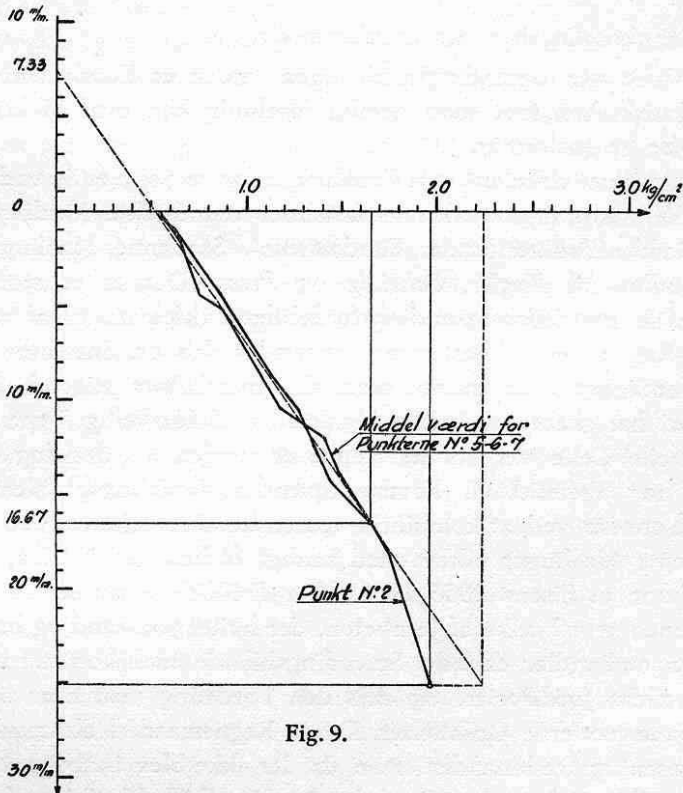
Tabel No. 1.

Maaling No.	Nedsynkning i mm af Punkterne No.						
	1	2	3	4	5	6	7
1.....
2.....	2,25	1,61	1,19	1,91	0,95	1,05	1,07
3.....	3,75	4,43	3,94	3,71	2,39	3,00	3,20
4.....	4,74	5,06	4,53	4,30	..	4,03	..
5.....	8,34	10,45	9,35	..	9,24	8,96	8,68
6.....	10,89	12,06	13,72	Maalepunktet ødelagt	10,84	10,29	..
7.....	12,29	13,86	14,22		12,01	11,37	..
8.....	14,36	18,00	19,22		14,31
9.....	20,42	25,17	28,27		17,81	16,47	15,73

Tabel No. 2.

Maaling No.	σ_A kg/cm ²	σ_B kg/cm ²	σ_F kg/cm ²	σ'_F kg/cm ²
1.....	0,53	0,51	0,54	0,54
2.....	0,64	0,61	0,65	0,65
3.....	0,75	0,73	0,75	0,75
4.....	0,87	0,85	0,86	0,86
5.....	1,19	1,14	1,21	1,21
6.....	1,41	1,27	1,38	1,35
7.....	1,49	1,31	1,41	1,41
8.....	1,73	1,44	1,59	1,49
9.....	1,95	1,65	1,85	1,74

Midterparti og C Resten. Inddelingen fremgaar af Fig. 5, hvor ogsaa det til hvert Parti svarende Areal af Fundamentet er angivet. F er det totale Areal. Ved at dividere de fundne Vægte med Fundamentsarealerne, findes da en Række Spændinger, som naturligvis ikke maa opfattes som andet end det, de er, nemlig tilnærmede Angivelser for et Middeltryk.



De fundne Talværdier er angivet i Tabel No. 2. Medens σ_F er hele Vægten divideret med hele Fundamentsarealet, betyder σ'_F hele Vægten minus den Vægt, der hidrører fra det egentlige Taarn.

I Fig. 9 ses to Kurver. Den ene viser Punkt 2's lodrette Bevægelser i Forhold til Spændingen σ_A , medens Ordinaterne til den anden Kurve er Middeltallet for Nedsynkningerne for Punkterne 5, 6 og 7. Som Abscisser for denne sidste Kurve er anvendt Værdierne σ_B . Det ses af Figuren, at den totale Nedsynkning for Punkterne 5, 6 og 7 kan sættes til $16,67 + 7,33 = 24$ mm. Dersom man i Stedet for at benytte Punkterne 5, 6 og 7 benytter Punkterne 1, 2 og 3, idet man reducerer Nedsynkningen med den Del, der ganske øjensynligt stammer fra selve Taarnet, kommer man til en Værdi, der er ca. 4 mm større, saaledes at Bygningens gennemsnitlige Nedsynkning kan sættes til 26 mm. Ved den teoretiske Beregning af Nedsynkningen, gik man ud fra et tænkt cirkelrundt Fundament, som ses angivet i Fig. 5. Det maa dog føre til en lidt for stor Nedsynkning, saaledes at den fundne Værdi 29,4 mm maatte betragtes som en øvre Grænse for den virkelige Nedsynkning. Forskellen imellem den virkelige og den beregnede Nedsynkning er saa ringe, at den ingen praktisk Betydning har.

Spændingsfordelingen under Fundamentet:

Vor Viden om Spændingsfordelingen under et Fundament er nærmest af sokratiske Art, idet man nemlig foreløbig kun med Sikkerhed ved, at den ikke er ensformig.

Selv under et cirkulært stift Fundament for en Søjle er Spændingsfordelingen ikke ensformig, hvilket er fastslaaet ved direkte Maaling af Trykket i en Række Punkter under Fundamentet. Saadanne Maalinger er blandt andet udført af *Køgler*, *Scheidig* og *Press*. Der er et stort Spring fra at fastslaa, hvorledes Spændingsfordelingen ikke er, til at angive almindelige Regler for at bestemme, hvorledes den er. Saadanne Regler eller Love foreligger ikke endnu, men de senere Aars stigende Interesse for Jordteori har skabt en Række Maaleceller af forskellig Type, og selv om den ideelle Celle vel endnu næppe er fundet, tør det dog formodes, at man i nær Fremtid vil komme Spændingsfordelingsproblemets Løsning noget nærmere ved at kombinere teoretiske Overvejelser med Resultaterne fra direkte Maalinger udført med stadigt forbedrede Maaleapparater.

I »Beton u. Eisen« 1935 H. 12, har *Fröhlich* behandlet en ca. 30 Meter lang Fundamentsbjælke af Jernbeton, der hviler paa Sand og bærer 4 Søjler. Artiklen omhandler dels det Spændingsbillede, man kommer til ved at gaa ud fra ældre Jordteorier, og dels den Fordeling man naar til ved at benytte mere moderne Opfattelser. De to Regnemaaders Slutresultater afviger ikke væsentlig fra hinanden, men da der ikke blev indbygget Maaleceller, ved man ikke, i hvor høj Grad de virkelige Forhold afviger fra de tænkte.

For et stort Plade- og Bjælkefundament, som det, paa hvilket den her omtalte Bygning hviler, er Forholdene naturligvis langt mere komplicerede, og der skal ikke her gøres noget Forsøg paa at angive Spændingsfordelingen talmæssigt. Kun skal det angives, at den Spændingsflade, man vilde faa ved i ethvert af Fundamentets Punkter at afsætte den hertil hørende Spænding lodret over Punktet, vil have et kuplet Udseende. I Hovedsagen vil det være saaledes, at »Kuplerne« findes ved Søjlerne, og »Dalene« imellem Søjlerne. De hertil svarende Spændings Maxima og Minima kan indtil videre ikke angives i Forhold til det paa Fladen virkende Middeltryk. Dette Middeltryk er imidlertid, saaledes som det er vist ovenfor, meget vel anvendeligt til Bestemmelsen af Fladens Nedsynkning, og det er ligeledes Middeltrykket, man foreløbig maa gaa ud fra, dersom man vil undersøge om Trykket paa Grunden ligger inden for det tilladelige.

I det foreliggende Tilfælde er det Taarnzonen, man først og fremmest maa undersøge. Det tør formodes, at der under de fire Taarnsøjler (se Fig. 5) findes et Parti af Fundamentet, for hvilket den i Tabel 2 angivne Værdi $\sigma_A = 1,95 \text{ kg/cm}^2$ er for lille. Dette fremgaar ogsaa af Fig. 9; der er nemlig ingen Grund til at antage, at Nedsynkningskurven for Punkt 2 i Virkeligheden har det i Figuren angivne Knæk. Langt rimeligere er det at antage, at den forøgede Nedsynkning skyldes et større Middeltryk. Antages Nedsynkningskurven at være en ret Linie, hvad den »bør« være, da vi befinder os inden for Proportionalitetsgrænsen, kommer man til, at Middeltrykket i Taarnzonen er $2,23 \text{ kg/cm}^2$. Hertil maa nu lægges dels den bevægelige Lasts Virkning, dels et Tillæg paa Grund af Vind. For den bevægelige Lasts Vedkommende kan man regne med et Tillæg paa $0,2 \text{ kg/cm}^2$, medens der for Vindens Virkning bemærkes følgende: Et Blik paa Fig. 5 viser, at man for at finde det største Vindtillæg i Randzonen under Taarnet maa tænke sig Stormen kommende vinkelret ind paa Husets Bagfacade. Dette er imidlertid en ret usandsynlig Antagelse idet de meteorologiske Forhold, givne ved Byens Beliggenhed ved den sydlige Vendekreds, er af en saadan Art, at saavel den daglige Blæst, som de nu og da optrædende Storme altid kommer fra bestemte Vindhjørner. Det er i Hovedsagen saaledes, at den daglige Blæst har Retningen fra Punkt 3 til 5 (se Fig. 5), medens de stærke Storme har Retning fra Punkt 1 til 5. Under Hensyn hertil sættes Vindtillæget til $0,31 \text{ kg/cm}^2$, saaledes at den samlede Randpaa-virkning bliver $2,74 \text{ kg/cm}^2$ medens det ovenfor blev fundet, at Grænsen kunde sættes til $2,65$ og $3,34 \text{ kg/cm}^2$.

Den indre Friktionsvinkel saavel som Spændingsfordelingen under et Fundament hører til de Problemer, det tilkommer Jordteoretikerne at løse, medens Spørgsmaalet om et givet Bygværks Sætning kan besvares af de Mennesker, der leder vedkommende Bygværks Opførelse. Af flere Grunde var det ønskeligt, om det blev almindeligt at følge et Bygværks Bevægelser

under, og eventuelt efter, dets Opførelse. For det første vilde det kunne bidrage til at udvide vor Viden om Jordarternes Væsen; for det andet er det dog utvivlsomt af Værdi, ja, kan i visse Tilfælde faa den største Betydning, dersom Ingeniøren paa Forhaand kender Sætningens Størrelse, og endelig, for det tredie, kan det faa Værdi for Ejeren. Dersom man nemlig lader Højdemærkerne sidde i den færdige Bygning, kan Ejeren faa et talmæssigt underbygget Materiale i Haanden til Brug i det Tilfælde, at en senere Nyopførelse af en Naboejendom fremkalder skadelige Sætninger, medførende Revnedannelse og lignende i Bygningen. Et saadant Materiale kan eventuelt faa retslig Betydning.

Rettelse til
Bygningsstatiske Meddelelser,
Aargang VIII, Nr. 3, Side 66.

—	Staudruck	=	23,2,	Kana
.....	”	=	6,8,	”
—	”	=	21,7,	”
-----	”	=	6,2.	”